

## 光纤陀螺系统中信号光反馈下的 激光光源强度噪声特性研究

彭纲定 黄上元 林宗琦

(上海交通大学电子工程系)

**提要:** 从建立光纤陀螺激光光源受信号光反馈作用时的等效腔模型出发, 对影响光源强度噪声的诸因素进行了理论分析, 结果与实验很好符合, 并提出了消除信号光反馈对系统性能影响的方法。

### Investigation of intensity noise of laser due to signal wave feedback in a fiber-optic gyroscope

*Peng Gangding, Huang Shangyuan, Lin Zongqi*

(Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai)

**Abstract:** The characteristics of intensity noise of laser due to signal wave feedback in a fiber-optic gyroscope is investigated. It has been found that the signal wave feedback would cause a large amount of intensity noise of laser and that an intensity noise peak appears at the signal detection frequency. By establishing a theoretical model for the laser in a fiber-optic gyroscope, the relations of the intensity noise with various factors in the gyroscope are analyzed and the results are in good agreement with those of experiment. Finally, the measured to reduce the effects of signal wave feedback on system performances are presented.

### 一、引言

自 Vali 和 Shorthill 1976 年实验演示光纤陀螺装置以来, 由于科技界、工业界的强烈兴趣, 促使了光纤陀螺研究在实用化方向上迅速发展。基于实际应用中光纤陀螺灵敏度的极高要求, 使得对系统中各种噪声及其消除方法的研究成为光纤陀螺发展中一个极为重要方面。然而对光纤陀螺系统中激光光源输出特性的研究, 迄今未见有报道。

就光纤陀螺而言, 为了保证严格的光路互易性以获得高灵敏度, 要求采用光纤陀螺特有的反射式结构<sup>[1]</sup>, 而此光路结构将会造成信号光反馈到光源而影响光源输出噪声特性。这是因为激光光源对光反馈极为敏感<sup>[2, 3]</sup>, 信号光反馈无疑会产生激光输出的扰动。我们的实验证实, 在采用通常位相调制偏置方式的光纤陀螺系统中, 信号反馈严重地干扰了激光光源的输出, 使其强度噪声较之独立光源时有明显的增大。特别是信号光

收稿日期: 1986年10月14日。

反馈引起的强度噪声在位相调制频率处亦即信号检测频率处出现峰值。由于在信号检测频率处的强度噪声对光纤陀螺系统位相检测性能影响最为严重,因此,该噪声峰将对系统性能尤其是短期漂移产生影响。光源强度噪声谱分析结果表明,很小的信号光反馈(强度反馈系数 $\sim 10^{-6}$ )就足以使在信号检测频率处的相对强度噪声(RIN)增加达两个数量级以上(约180倍)。

本文建立了光纤陀螺系统中激光光源受信号光反馈干扰的激光等效腔模型,并对系统中激光光源强度噪声特性进行了理论分析和实验研究。

## 二、理论分析

以下我们将仅考虑信号光反馈对激光光源的干扰,其它光反馈,如光学元件、光纤端面费涅尔反射产生的光反馈,都可用适当措施加以消除。此外,光纤中瑞利散射产生的光反馈,在正常情况下,相对于信号光反馈要小得多。

对于通常采用的位相调制偏置方式的光纤陀螺,在分析信号光反馈对激光光源影响时,我们先建立系统中激光光源的等效腔模型。如图1所示的系统中,受到信号光反馈影响的激光源,可以通过以下两个步骤来建立它的理论模型,如图2所示。首先,把通过光纤 Sagnac 干涉环的信号光对激光光源的反馈,看作为一个具有复反射系数 $r_3$ 的第三个反射镜所产生反射光的反馈。此复反射系数为

$$r_3 = E_s e^{i\phi_L} (e^{-i\phi_r/2 + i\Phi_m \sin \omega_m t} + e^{i\phi_r/2 + i\Phi_m \sin \omega_m (t-\tau)}) \quad (1)$$

式中 $\phi_r$ 代表转动产生的 Sagnac 位相; $\Phi_m$ 为位相调制幅度; $\omega_m$ 为位相调制频率; $\tau$ 为信号光通过光纤 Sagnac 干涉环带来的群速延迟, $\phi_L$ 的位相延迟; $E_s$ 代表光纤 Sagnac 干涉仪输出的信号光幅度。 $E_s$ 的大小由激光

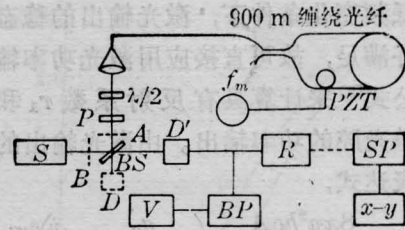


图1 实验装置

S—He-Ne 激光器; BS—分光镜; P—偏振器;  $\lambda/2$ —半波片; D, D'—PIN 光探测器; PZT—位相调制器; BP—带通滤波器; B—声磁带机; SP—谱分析仪; V—电压表;  $f_m$ —信号源加到 PZT 筒上的相位调制频率

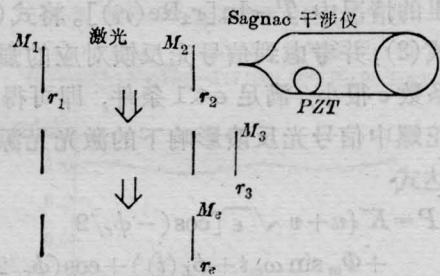


图2 光纤光学陀螺中的激光理论模型

入纤耦合效率、光纤的吸收损耗等因素决定。

其次,运用激光等效腔<sup>[4]</sup>的概念,用一个等效反射镜 $M_e$ 代替反射镜 $M_2$ 和 $M_3$ 的共同作用。由式(1)可得反射镜的等效反射系数为

$$r_e = r_2 (1 + \sqrt{\epsilon} [e^{-i\phi_r/2 + i\Phi_m \sin \omega_m t} + e^{i\phi_r/2 + i\Phi_m \sin \omega_m (t-\tau)}] e^{i\phi_L}) \quad (2)$$

式中 $\epsilon$ 与 $r_2$ 和 $E_s$ 有关,代表信号光对激光光源反馈的大小,暂称之为信号光强度反馈系数; $\phi_L$ 是信号光返回到激光光源所经历的总相延,包括在光纤 Sagnac 干涉环中及光纤端面( $M_3$ 位置)到激光反射镜 $M_2$ 之间这两部分位相延迟。由于随机应力、声学噪声、热起伏诸物理因素的影响, $\phi_L$ 随时间作不规则涨落,可表达为时间函数 $\phi_L(t)$ ,从而激光输出中与 $\phi_L$ 的有关项皆成为随机噪声项。

由于激光光源的位相噪声直接对系统噪声的贡献不大,而激光光源的强度噪声则将影响光纤陀螺的系统噪声。

在低频变化条件下, 激光输出的稳态条件能很好满足, 故可直接应用激光功率输出的有关公式<sup>[5]</sup>来计算具有反射系数 $r_1$ 和 $r_e$ 的等效激光腔的功率输出。由激光输出的有用功率表达式,

$$P_0 = \frac{8\pi n^2 hc A}{g(\nu_0) \lambda^3 \frac{t_2}{t_{\text{spont}}}} \left( \frac{g_0}{L_i + T} - 1 \right) T \quad (3)$$

式中 $n, h, c, A, t_{\text{spont}}, t_2, g_0, g(\nu_0), L_i$ 均为与激光有关的常数;  $T$ 为有用功率耦合因子, 我们这里的情况中,  $T = \ln[r_1 \text{Re}(r_e)]$ 。将式(2)代入式(3), 并考虑到信号光反馈对应的强度反馈系数 $\epsilon$ 很小, 满足 $\epsilon \ll 1$ 条件, 即可得出光纤陀螺中信号光反馈影响下的激光光源输出表达式

$$P = K \{ u + v \sqrt{\epsilon} [\cos(-\phi_r/2 + \Phi_m \sin \omega_m t + \phi_L(t)) + \cos(\phi_r/2 + \Phi_m \sin \omega_m(t - \tau) + \phi_L(t))] \} \quad (4a)$$

式中

$$K = \frac{8\pi n^2 hc A}{g(\nu_0) \lambda^3 \frac{t_2}{t_{\text{spont}}}} \quad (4b)$$

$$u = \ln(r_1 r_2) [1 - g_0 / (L_i - \ln(r_1 r_2))] \quad (4c)$$

$$v = 1 - L_i g_0 / [L_i - \ln(r_1 r_2)]^2 \quad (4d)$$

对式(4a)进行 Bessel 函数展开, 利用  $\cos(\phi + K \sin \omega t)$

$$= J_0(K) \cos \phi - 2J_1(K) \sin \phi \sin \omega t + \dots,$$

可把激光输出的强度噪声表达为位相调制频率的基波和高次谐波项。由于系统的信号检测频率就是位相调制基频, 因此位相调制基频处的强度噪声会与信号混杂, 损害系统的位相检测灵敏度。下面我们来考察激光强度噪声在位相调制基频处分量的性质, 由式(4)和 Bessel 函数展开式可得

$$P_{\omega_m} \propto \sqrt{\epsilon} J_1(\Phi_m) [\sin \phi_L(t) \times \sin \omega_m(t - \tau/2) \cos(\phi_r/2) \cos(\omega_m \tau/2) + \cos \phi_L(t) \cos \omega_m(t - \tau/2) \sin(\phi_r/2) \times \sin(\omega_m \tau/2)] \quad (5)$$

从上式可见, 调制基频处的强度噪声与位相调制系数以一阶 Bessel 函数形式相联系, 且此项噪声与信号光对光源的反馈系数 $\epsilon$ 直接有关。由 $P_{\omega_m}$ 与 $\Phi_m$ 的关系可知, 若选择位相调制系数使其满足 $J_1(\Phi_m) = 0$ , 则信号光反馈产生的强度噪声项 $P_{\omega_m}$ 原则上可以消除。此外, 由 $P_{\omega_m}$ 与 $\phi_L$ 的关系亦可知道, 若在激光光源与光纤 Sagnac 干涉仪之间(即图 1 中的 B 位置)加上另一位相调制器, 则 $\phi_L(t)$ 受到调制, 成为

$$\phi_L(t) = \phi_L^0(t) + 2\Phi'_m \cos(\omega'_m \tau/2) \times \sin(\omega'_m(t - \tau/2)) \quad (6)$$

式中 $\phi_L^0(t)$ 为原光路上的总位相延迟, 仍随时间作不规则涨落;  $\Phi'_m$ 为此第二个位相调制器的调制幅度;  $\omega'_m$ 为其调制频率, 满足 $\omega'_m \ll \omega_m$ 或 $\omega'_m \gg \omega_m$ 。由上式并利用 Bessel 函数展开, 有

$$\sin \phi_L(t) = J_0 \left( 2\Phi'_m \cos \frac{\omega'_m \tau}{2} \right) \times \sin \phi_L^0(t) + \omega'_m$$

的谐波项及

$$\cos \phi_L(t) = J_0(2\Phi'_m \cos(\omega'_m \tau/2)) \times \cos \phi_L^0(t) + \omega'_m$$

的谐波项, 从而得到

$$P_{\omega_m} \propto \sqrt{\epsilon} J_1(\Phi_m) J_0 \left( 2\Phi'_m \cos \frac{\omega_m \tau}{2} \right) \times [\sin \omega_m(t - \tau/2) \cos(\phi_r/2) \times \cos(\omega_m \tau/2) \sin \phi_L^0(t) + \cos \omega_m(t - \tau/2) \sin(\phi_r/2) \times \sin(\omega_m \tau/2) \cos \phi_L^0(t)] \quad (7)$$

式中调制频率基波处强度噪声 $P_{\omega_m}$ 以零阶 Bessel 函数形式和第二个位相调制器的调制幅度 $\Phi'_m$ 相联系。很明显, 使用这一附加位相调制器也能选择合适的 $\Phi'_m$ , 而使 $J_0(2\Phi'_m \cos(\omega_m \tau/2))$ 为零, 而同样达到消除强度噪声 $P_{\omega_m}$ 项的目的。

### 三、实验及其结果

实验装置如图 1 所示, 它与通常采用的

位相调制偏置方式光纤陀螺基本相同,只是在分光镜  $BS$  后加了一个 PIN 光探测器  $D'$ ,用来在光纤陀螺工作的同时监测激光光源的功率输出。所用光源  $S$  为单频稳功率 He-Ne 激光器 (632.8 nm), 输出功率约 3 mW。探测器  $D'$  的输出用精密声谱磁带机  $R$  (BK 7006) 记录,并用频谱分析仪  $SP$  (7T08) 进行谱分析。

激光强度噪声谱分析结果如图 3 所示,此时频谱分析仪带宽为 48.8 Hz。图中标度的相对强度噪声 (RIN),按下式定义<sup>[6]</sup>

$$RIN = \frac{i^2(\omega)}{i^2(0)B} \quad (8)$$

式中  $i(\omega)$  为 PIN 输出的交流噪声电流,  $i(0)$  为 PIN 输出的直流电流;  $B$  为谱分析仪带宽。

图 3(a) 为独立的激光源的低频强度噪

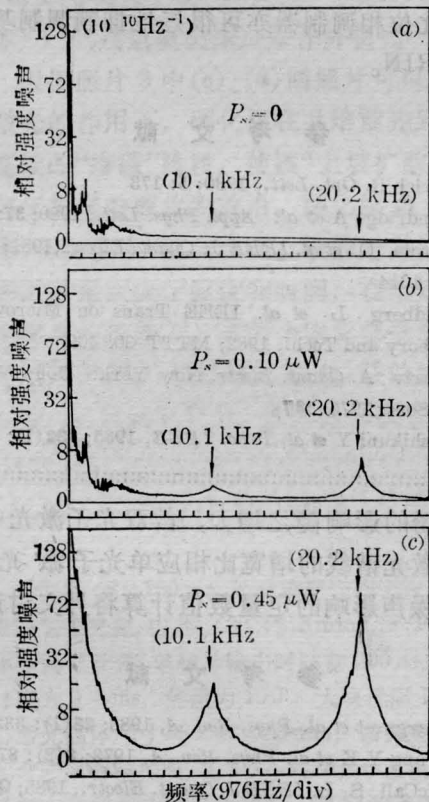


图 3 强度噪声低频谱对比

(a) 独立 He-Ne 激光源; (b)、(c) 光纤陀螺中的同一台激光器;

$P_s$ ——表示由 Sagnac 干涉仪到达  $D$  的信号功率

声谱。它是在图 1 所示的实验装置中在  $A$  处加一光屏隔断激光与光纤系统耦合的条件下得到的。图 3(b)、(c) 是在系统工作条件下 (即有信号光反馈) 的光源强度噪声谱。对应图 3(b)、(c) 的信号光功率分别为  $0.1 \mu\text{W}$  和  $0.45 \mu\text{W}$ 。这里信号光功率  $0.45 \mu\text{W}$ , 对应的信号光强度反馈系数约为  $10^{-6}$  数量级。需要说明的一点是, 图 3(b)、(c) 这两种不同信号光强度的实验情况是通过调整入纤功率耦合得到的。具体地说, 为了减小  $P_s$ , 我们改变了耦合显微镜物镜和光纤端面的相对位置及分光镜  $BS$  的方位。因此真正反射回激光器的功率与  $P_s$  的值并不严格成正比。这些谱特性显示, 在光纤陀螺系统中激光源的强度噪声较之独立激光源的强度噪声有一个重要特征, 强度噪声在位相调制频率 (10.1 kHz) 的基波和高次谐波处出现峰值。

与信号光强度有关、且对信号中位相调制基频分量进行的信号检测, 决定了在位相调制频率处的光源强度噪声分量将对系统性能尤其是短期性能产生严重影响。根据信号检测公式我们可以对强度噪声产生的位相误差或灵敏度限制进行估计。由信号光强度

$$I_s = I_0 \left[ J_0 \left( 2\Phi_m \sin \frac{\omega_m \tau}{2} \right) \cos \phi_r + 2J_1 \left( 2\Phi_m \sin \frac{\omega_m \tau}{2} \right) \sin \phi_r \times \cos \omega_m (t - \tau/2) + \dots \right],$$

当存在光源强度噪声

$$I_0 = I_0(0) + I_0(\omega_m) + \dots$$

时, 则光源强度噪声产生的最大相位误差能近似表达为

$$\Delta\phi_{\max} = \sqrt{B \cdot RIN} \frac{J_0 \left( 2\Phi_m \sin \frac{\omega_m \tau}{2} \right)}{2J_1 \left( 2\Phi_m \sin \frac{\omega_m \tau}{2} \right)} \quad (9)$$

按上式估计图 3(c) 中的情况, 对应于  $\epsilon$  为  $10^{-6}$  数量级, 信号光反馈产生的光源强度噪声引起的最大位相误差可达约  $2 \times 10^{-4}$  rad

(此时  $J_0/J_1$  为 0.79), 足以产生对系统位相检测灵敏度的限制。这与我们对光纤陀螺系统性能的实验观察和记录结果相一致。实验中, 激光与陀螺系统之间未加任何隔离器件, 发现耦合功率越强, 信号光功率越强, 位相检测灵敏度反而降低, 与 Shot Noise 限制或是 Rayleigh 散射噪声限制情况矛盾, 说明信号光反馈对光源的干扰产生了对光纤陀螺系统性能的实际限制。

图 4 给出了激光光源在调制基频处的归一化强度噪声与位相调制幅度  $\Phi_m$  的关系曲线, 实验结果能很好地符合理论分析结果式 (5)。由该图可见, 位相调制幅度  $\Phi_m$  从 1.83 rad 附近 ( $J_1(\Phi_m)$  极大) 增加到 3.83 rad 附近 ( $J_1(\Phi_m)$  为零) 时, RIN 的抑制可达三个数量级。

图 5 是附加一位相调制器于图 1 中 B 位置处情况下得到的实验数据与由式 (7) 给出

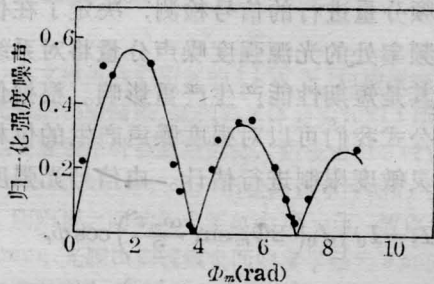


图 4 探测频率处的归一化强度噪声与图 1 中位相调制器的调制振幅  $\phi_m$  的关系  
曲线——理论值; ·——实验值

(上接第 79 页)

#### 四、讨 论

双光子激光中, 噪声对激光谱线线型的影响较单光子复杂, 这是因为方程 (16) 没有解析形式的瞬态解。从定性上讲, 双光子激光中是单模激光场和偶极子  $\mu_{aj}, \mu_{bj}$  作用, 而不是单光子激光时的  $\mu_{ab}$ , 故  $\beta, \gamma$  通过  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  相应地与  $K_{ab}^2$  和  $K_{ab}^4$  相关而不是单光子激光时与  $\mu_{ab}$  相关, 随着场强的增大, 噪声对

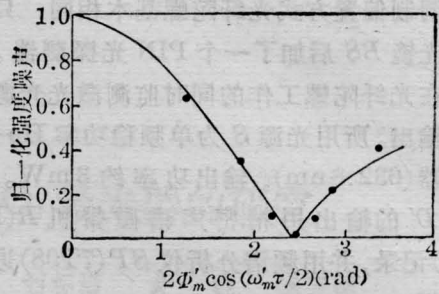


图 5 探测频率处归一化强度噪声与图 1 中 B 点上附加位相调制器调制振幅  $\phi'_m$  的关系  
——理论曲线; ····实验值

的理论曲线的比较。图中给出的在调制基频处归一化强度噪声与位相调制幅度  $\phi'_m$  的关系, 显示了实验和理论分析符合相当好。在此实验中,  $\Phi_m = 2.1 \text{ rad}$  ( $J_1(\Phi_m) = 0.57$ ),  $\omega'_m$  对应的调制频率为 54 kHz, 满足  $\omega'_m \gg \omega_m$  (对应的调制频率 10.1 kHz)。实验数据表明, 此位相调制器亦可很好地抑制调制基频处的 RIN。

#### 参 考 文 献

- 1 Ulrich R. *Opt. Lett.*, 1980; **5**: 173
- 2 Dandridge A *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1980; **37**: 526
- 3 Hirota O *et al. IEEE J. Quant. Electr.*, 1981; **QE-17**: 1014
- 4 Goldberg L *et al. IEEE Trans on Microwave Theory and Tech.*, 1982; **MTT-30**: 409
- 5 Variv A. *Quant. Electr.* New York: John Wiley & Sons. 1975: **137**
- 6 Yoshikuni Y *et al. Proc. IEEE*, 1985; **132**(1): 21

激光场的影响随之增大, 故双光子激光中噪声对激光谱线的增宽比相应单光子激光大。至于噪声影响的定量数值计算将另文讨论。

#### 参 考 文 献

- 1 Margaret *et al. Phys. Rev. A*, 1983; **28**(1): 332
- 2 Wang Y K *et al. Phys. Rev. A*, 1973; **8**(2): 873
- 3 McCall S L. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1985; **QE-21**(9): 1441
- 4 汪志诚. *«光学学报»*, 1983; **3**(1): 36
- 5 Naducci M *et al. Phys. Rev. A*, 1977; **16**(4): 1665
- 6 Chandrasker S. *Rev. Mod. Phys.*, 1943; **15**: 1